

KAJIAN KEBERKESANAN KAEDAH PEMBAKARAN UDARA BERPERINGKAT KE ATAS PEMBAKAR BERBAHAN API GAS

Mohammad Nazri Mohd Jaafar
Mohd Sharul bin Sulian

Fakulti Kejuruteraan Mekanikal,
Universiti Teknologi Malaysia,
81310 UTM Skudai,
Johor, MALAYSIA
(Email: nazri@fkm.utm.my)

ABSTRAK

Proses pembakaran dari pembakar yang menggunakan gas sebagai bahan api berkecenderungan untuk memancarkan emisi yang mengandungi pelbagai bahan cemar seperti NO_x , CO , CO_2 dan sebagainya. Emisi ini perlu dikurangkan kerana kesannya boleh mendatangkan bencana yang buruk ke atas hidupan di muka bumi. Oleh itu, kajian keberkesanan pembakaran udara berperingkat bagi pembakar ini amat penting bagi memastikan pembakar dapat beroperasi dengan cekap dalam keadaan penghasilan emisi yang rendah. Ujikaji dijalankan dengan cara mengawal parameter kadar alir udara pada nilai 7, 8, 9, 10 dan 12 g/s yang bersepadanan dengan nisbah setara 0.73, 0.86, 0.92, 1.0 dan 1.07. Hasil ujikaji menunjukkan bahawa terdapat pengurangan dalam bahan cemar NO_x dan CO yang dihasilkan dengan menggunakan pembakaran udara berperingkat ke atas pembakar gas.

Katakunci: Pembakar gas, pembakaran udara berperingkat, CO , NO_x , CO_2

1.0 PENGENALAN

Pembakar yang menggunakan gas sebagai bahan api semakin meluas digunakan di Malaysia sebagai alternatif kepada penggunaan arang dan bahan api cecair. Ini kerana, pembakaran bahan api gas tidak membabitkan pembebasan partikel-partikel halus sebagaimana arang, mudah dikawal dan keperluan udara lebihan yang rendah bagi membantu meningkatkan kecekapan pembakaran.

Walau bagaimanapun, dalam mana-mana proses pembakaran sekalipun akan wujud emisi-emisi yang boleh mencemarkan alam sekitar. Paling membimbangkan ialah kewujudan pancaran NO_x . NO_x terhasil akibat daripada pembebasan molekul N yang tidak stabil dari N_2 yang berkecenderungan untuk bergabung dan membentuk konfigurasi oktet yang stabil. Ia akan bergabung dengan molekul O dari O_2 dari udara untuk membentuk NO dan NO_2 atau lebih ringkas sebagai NO_x . Tambahan pula, emisi NO_x akan meningkat di sebalik penurunan emisi CO apabila masa pembakaran bertambah [1].

Oleh itu, kajian ke atas emisi ini perlu dilakukan dan salah satu cara untuk mengurangkan dan mengawalinya adalah dengan mengenalpasti parameter-parameter pembakar. Antaranya ialah dengan cara mengawal kadar alir udara dan bahan api. Parameter ini juga boleh menentukan prestasi sesebuah pembakar melalui nisbah kesetaraan yang akan menentukan sama ada pencampuran yang berlaku di dalam pembakar membentuk campuran kaya bahan api, stoikiometri atau pun cair bahan api.

2.0 TEORI

2.1 Pembakaran Bahan Api Gas

Pembakaran gas berlaku melalui dua cara, bergantung kepada bila bahan api dan udara dicampurkan. Apabila bahan api dan udara dicampur sebelum proses nyalaan, seperti yang berlaku dalam penunu bunsen, pembakaran diteruskan melalui penghidroksilan. Hidrokarbon dan oksigen dari sebatian hidroksil akan menjadi aldehid; tambahan haba dan tambahan oksigen menguraikan aldehid kepada H_2 , CO , CO_2 , dan H_2O . Oleh sebab karbon telah ditukarkan kepada aldehid pada peringkat permulaan pencampuran, tiada jelaga boleh terbentuk walau pun nyalaan dikenakan proses lindap kejut.

Peretakan berlaku apabila oksigen ditambah kepada hidrokarbon selepas ia dipanaskan, memecahkan semula hidrokarbon kepada karbon dan hidrogen. Apabila ia digabungkan dengan oksigen yang mencukupi, CO_2 dan H_2O akan terbentuk. Jelaga dan karbon hitam akan terbentuk sekiranya oksigen yang tidak mencukupi wujud ataupun jika proses pembakaran dihentikan sebelum lengkap.

Satu kaedah lagi ialah pembakaran secara percampuran pantas di dalam kebulut-pembakaran di mana udara dan bahan api dicampur dengan pantas berbantuan aliran gelora sebelum campuran bahan boleh bakar (udara dengan bahan api) dicucuh.

Campuran bahan api dan udara di dalam kebulut-pembakaran mempengaruhi pembakaran yang diperolehi ketika menjalankan ujikaji. Pencampuran bahan api dan udara dikelaskan kepada tiga jenis berdasarkan kepada kandungan bahan api yang digunakan berbanding udara atau oksigen yang dibekalkan. Jenis campuran yang dimaksudkan ialah campuran kaya bahan api, stoikiometri dan cair bahan api.

Tahap kandungan bahan api dengan udara dipersembahkan dalam bentuk nisbah bahan api per udara (dalam nilai jisim), f/a ; dan nisbah bahan api per udara sebenar kepada nisbah bahan api per udara stoikiometri sebagai nisbah setara, ϕ . Nisbah bahan api per udara boleh didapati melalui pengiraan secara teori ataupun melalui ujikaji. Manakala nisbah kesetaraan pula dibincangkan dengan lebih lanjut seperti berikut.

Nisbah setara merupakan perbandingan antara nisbah bahan api per udara semasa ujikaji dengan nisbah bahan api per udara stoikiometri yang didapati melalui pengiraan. Ia dapat memberi gambaran mengenai campuran yang terjadi

di dalam kebuk pembakaran. Apabila nisbah setara bersamaan dengan 1.0 pada puncak aliran jisim udara, campuran bahan api dengan udara adalah sempurna dan nilai nisbah bahan api per udara ujikaji adalah bersamaan dengan nilai nisbah bahan api per udara stoikiometri. Nisbah setara yang melebihi nilai 1.0 pada sebelah luar kawasan stabil pula menunjukkan campuran kaya bahan api; manakala nisbah setara yang kurang daripada 1.0 pada luar kawasan stabil pula menunjukkan campuran cair bahan api.

2.2 Analisis Hukum Pertama Bagi Sistem Bertindak balas

2.2.1 Sistem Aliran Mantap

Sebelum hubungan keseimbangan tenaga dapat diungkapkan, adalah perlu untuk menyatakan entalpi bagi suatu komponen dalam bentuk yang bersesuaian bagi kegunaan sistem bertindak balas, iaitu bentuk entalpi perlu berkurang kepada entalpi pembentukan pada titik rujukan piawai. Ini dapat diterangkan menerusi persamaan berdasarkan unit mol, iaitu [2]

$$Entalpi = \bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (1)$$

dengan bentuk di atas mewakili entalpi rasa (sensible) relatif kepada titik rujukan piawai, dengan perbezaan di antara \bar{h} (entalpi rasa pada titik tertentu) dengan \bar{h}° (entalpi rasa pada 25°C dan 1 atm). Definisi ini membolehkan nilai entalpi digunakan dari jadual tanpa mengira titik rujukan yang digunakan dalam membinanya.

Apabila perubahan tenaga kinetik dan keupayaan diabaikan, hubungan keseimbangan tenaga aliran mantap $\dot{E}_{masuk} = \dot{E}_{keluar}$ dapat dinyatakan bagi tindak balas kimia dalam sistem aliran mantap dengan lebih jelas iaitu [2]

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{masuk} + \dot{W}_{masuk} + \sum \dot{n}_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r = \\ \dot{Q}_{keluar} + \dot{W}_{keluar} + \sum \dot{n}_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p \end{aligned} \quad (2)$$

dengan persamaan di sebelah kiri merupakan kadar pemindahan tenaga masuk bersih disebabkan oleh haba, kerja dan jisim, manakala persamaan di sebelah kanan pula merupakan kadar pemindahan tenaga keluar bersih disebabkan oleh haba, kerja dan jisim. Dalam persamaan (2) juga \dot{n}_p dan \dot{n}_r mewakili kadar alir mol bagi hasil tindak balas p dan bahan tindak balas r .

Dalam analisis pembakaran, adalah lebih sesuai untuk berurusan dengan kuantiti dalam bentuk per mol bahan api. Hubungan tersebut dapat diperolehi dengan cara membahagikan setiap bentuk dalam persamaan (2) dengan kadar alir mol bagi bahan api, menjadikannya [2]

$$Q_{masuk} + W_{masuk} + \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r = \quad (3)$$

$$Q_{keluar} + W_{keluar} + \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p$$

dengan N_r dan N_p mewakili bilangan mol bagi bahan tindak balas r dan hasil tindak balas p , masing-masing per unit mol bahan api. $N_r = 1$ bagi bahan api, manakala nilai N_r dan N_p boleh diperolehi secara langsung dari persamaan seimbang pembakaran. Dengan mengambil pemindahan haba ke dalam sistem dan kerja yang dilakukan oleh sistem sebagai kuantiti positif, hubungan keseimbangan haba boleh dinyatakan dengan lebih padat sebagai [2]

$$Q - W = \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p - \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r \quad (4)$$

ataupun sebagai

$$Q - W = H_p - H_r \quad (\text{kJ/kmol bahan api}) \quad (5)$$

Sekiranya entalpi pembakaran \bar{h}_c^o bagi tindak balas tertentu wujud, persamaan tenaga aliran mantap per mol bahan api boleh dinyatakan sebagai [2]

$$Q - W = \bar{h}_c^o + \sum N_p (\bar{h} - \bar{h}^o)_p - \sum N_r (\bar{h} - \bar{h}^o)_r \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (6)$$

Hubungan keseimbangan tenaga di atas kadangkala dinyatakan tanpa bentuk kerja kerana kebanyakan proses pembakaran aliran mantap tidak melibatkan interaksi kerja.

Kebuk pembakaran kebiasaannya melibatkan haba keluaran tetapi tanpa haba masukan. Oleh sebab itu, keseimbangan tenaga bagi proses pembakaran aliran mantap yang umum akhirnya menjadi [2]

$$Q_{keluar} = \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r - \sum N_p (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_p \quad (7)$$

Persamaan (7) menunjukkan haba keluaran semasa proses pembakaran adalah merupakan perbezaan di antara tenaga bahan tindak balas yang masuk dengan tenaga hasil tindak balas yang meninggalkan kebuk pembakaran.

2.3 Pembakaran Udara Berperingkat

Kaedah pembakaran udara berperingkat adalah salah satu teknik yang berkesan untuk mengawal emisi iaitu NO_x , CO, asap dan UHc. Udara berperingkat adalah berkaitan dengan pembekalan udara kedua atau mungkin sehingga mencapai ketiga dengan tujuan untuk menambahkan kandungan O_2 di dalam kebuk.

Apabila sebahagian daripada bahan bakar habis bertindak balas dengan udara bekalan utama, udara tambahan dimasukkan bertujuan untuk membolehkan

kesemua bahan bakar bertindak balas dengan lengkap untuk menghasilkan tindak balas hampir stoikiometri.

2.3.1 Kesan Udara Berperingkat ke atas Emisi NO_x

Gas NO_x terhasil daripada tindak balas yang berlaku antara O₂ dan N₂ di dalam kebulut pada suhu yang tinggi iaitu 1800K dan ke atas. Oleh itu, masa untuk mencapai suhu puncak ini yang akan dapat mengurangkan kadar penghasilan NO_x perlu dikurangkan atau dilambatkan. Kaedah yang berkesan ialah dengan menggunakan udara berperingkat.

Dengan cara ini, pembakaran udara yang mencukupi dapat dilakukan tanpa menambahkan suhu kebulut secara mendadak. Pada tahap pembakaran utama iaitu semasa udara utama dibekalkan, sebahagian bahan api terbakar di samping meningkatkan suhunya sehingga semua O₂ habis terbakar. Pada ketika ini apabila udara tambahan dibekalkan ia akan melengkapkan proses pembakaran tadi. Semasa udara kedua dibekalkan, sebahagian haba semasa pembakaran utama tadi dibebaskan akibat tindakan keseimbangan terma dengan udara yang dimasukkan tadi yang menyebabkan masa untuk mencapai suhu puncak semakin bertambah dan mengurangkan suhu kebulut yang dapat mengurangkan penghasilan NO_x. Ini berbeza sekiranya sejumlah udara yang banyak dibekalkan sekaligus dengan tujuan untuk menghasilkan pembakaran yang lengkap tetapi pada masa yang sama meninggikan suhu pembakaran akibat masa untuk mencapai suhu puncak yang singkat dan suhunya bertambah apabila pembakaran terus dilakukan.

2.3.2 Pengaruh Udara Berperingkat ke atas CO

Terdapat dua faktor utama penghasilan CO iaitu :

1. Kekurangan bekalan udara yang mengurangkan O₂ lalu menghadkan pengoksidaan karbon di dalam bahan bakar.
2. Suhu pembakaran yang rendah di mana suhu yang tinggi diperlukan untuk menghasilkan CO₂.

Apabila udara berperingkat dibekalkan maka nisbah udara bahan api akan bertambah yang akan menambahkan kandungan O₂ dalam kebulut yang secara teorinya boleh mengurangkan pancaran CO, tetapi telah dibincangkan sebelum ini bahawa penggunaan udara berperingkat akan mengurangkan suhu kebulut. Oleh itu pada peringkat pertama pembakaran iaitu udara utama digunakan maka kadar penghasilan CO adalah tinggi akibat kandungan O₂ yang kurang. Namun apabila udara tambahan dibekalkan, lebih banyak O₂ yang dibekalkan. Apabila suhu kebulut telah stabil dan mencapai suhu yang tinggi maka CO yang terbentuk tadi akan bertindak balas dengan O₂ untuk menghasilkan CO₂.

2.3.3 Kesan Udara Berperingkat Terhadap UHc dan Asap

Dengan nisbah udara bahan api yang tinggi, ia dapat mengurangkan penghasilan hidrokarbon tidak terbakar (UHc). Udara tambahan yang dibekalkan akan

bertindak balas dengan UHc untuk membentuk wap air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2) [3].



Persamaan (8) menunjukkan pembakaran lengkap yang tidak menghasilkan C manakala persamaan (9) adalah pembakaran tidak lengkap yang menghasilkan C. Udara tambahan juga dapat mengelakkan pembentukan asap hitam kerana bekalan O_2 yang mencukupi.

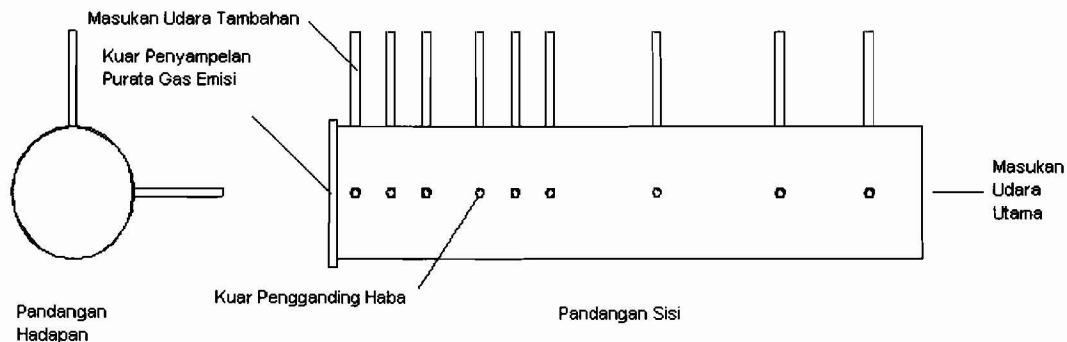
3.0 PROSES REKA BENTUK, BAHAN DAN FABRIKASI

3.1 Reka bentuk Kebuk Pembakaran

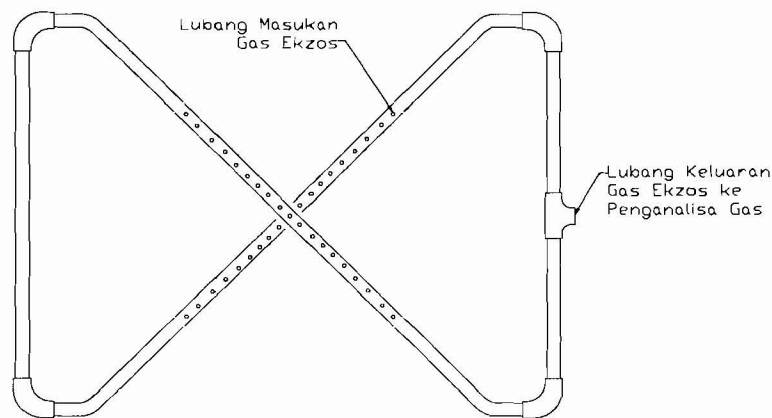
Dalam kajian ini, dua buah kebuk pembakaran dihasilkan iaitu bahagian utama dan bahagian lanjutan dengan setiap satunya berbeza dimensi dari segi panjangnya. Pada kedua-dua sisi kebuk pembakaran terdapat bebibir. Pada kebuk pembakaran utama terdapat komponen tambahan iaitu tiub geronggong bagi tujuan pengukuran suhu dan tekanan. Gambarajah skematik rig ujikaji pembakar berbahan api gas yang digunakan di dalam kajian ini ditunjukkan dalam Rajah 1.

3.2 Reka bentuk Kuar Penyampelan Gas

Reka bentuk kuar penyampelan gas purata adalah sama seperti yang digunakan oleh Lister dan Wedlock [4] serta Ahmad Suhaimi Ahmad Rahim [5], cuma yang menjadi perbezaan adalah kuar ini tidak disejukkan dengan air. Kuar ini mempunyai 40 lubang bermula dari tengahnya dengan setiap sisi mempunyai bilangan lubang yang sama. Gambarajah skematik kuar penyampelan ini ditunjukkan dalam Rajah 2.



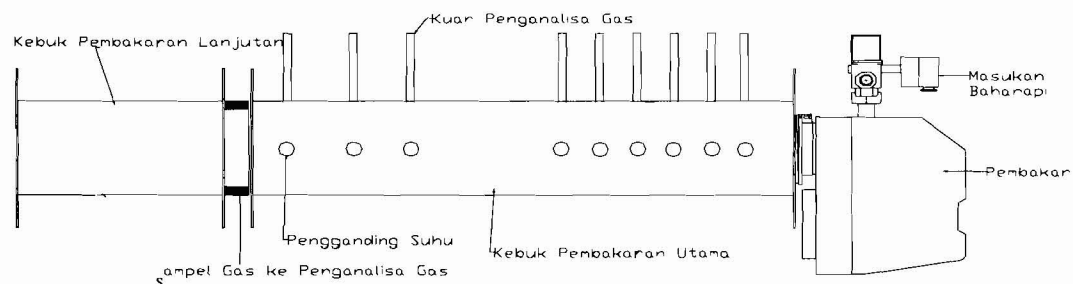
Rajah 1 Reka bentuk Kebuk Pembakaran Utama



Rajah 2 Reka bentuk Kuar Penyampelan Purata Gas

4.0 METODOLOGI UJIKAJI

Dalam kajian ini, parameter yang dikawal adalah kadar alir udara. Ini adalah kerana kadar alir udara memainkan peranan penting dalam mempengaruhi kecekapan ujikaji kerana ia mempengaruhi suhu kebuk yang turut mempengaruhi kadar penghasilan gas-gas emisi. Bagi kadar alir udara berperingkat pula, ia ditetapkan pada 40 l/s kerana pada nilai ini, suntikan ke dalam kebuk pembakaran yang lebih mantap dapat dibekalkan. Kadar alir udara diukur dengan menggunakan tiub pitot. Tempat udara kedua ini disalurkan juga mempengaruhi keputusan ujikaji kerana ia mempengaruhi tindak balas pengoksidaan yang berlaku di dalam kebuk. Kesemua ini ditunjukkan dalam Rajah 3.



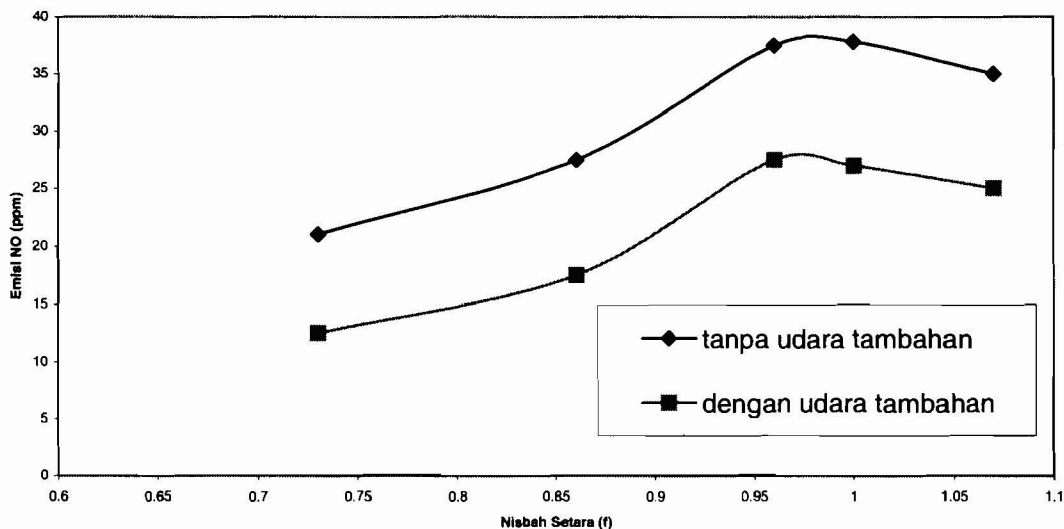
Rajah 3 Rig Ujikaji Keseluruhan

5.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

5.1 Emisi NO melawan Nisbah Setara

Rajah 4 menunjukkan bahawa kepekatan emisi NO meningkat dengan meningkatnya nisbah setara sehinggalah mencapai $\phi = 1.0$. Selepas dari itu, kepekatan NO mula berkurangan dengan peningkatan nisbah setara. Ini adalah bertepatan dengan lengkung teori yang diberikan oleh Lefebvre [1].

Graf yang diplotkan juga menunjukkan perbandingan nilai emisi bagi pembakaran tanpa suntikan udara berperingkat dan pembakaran dengan udara berperingkat. Walau pun berlaku kenaikan emisi pada ϕ yang kurang dari 1, tetapi jika dibandingkan dengan pembakaran tanpa udara berperingkat, pembakaran dengan udara berperingkat menunjukkan terdapatnya pengurangan kepekatan emisi. Pengurangan emisi sebanyak 38.1%, 34.5%, 25.6% dan 27.5% dialami dengan suntikan udara berperingkat. Begitu juga yang berlaku pada ϕ yang besar dari 1 dengan pengurangan sebanyak 27.8% dengan udara tambahan. Peningkatan kepekatan emisi ini berlaku disebabkan oleh peningkatan suhu pada ϕ yang berbeza.

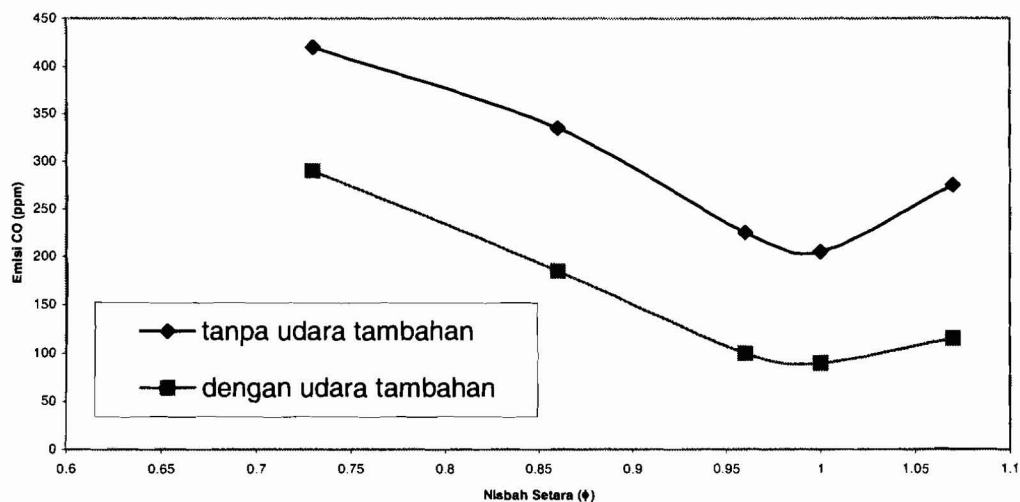


Rajah 4 Perbandingan Emisi NO melawan Nisbah Setara.

5.2 Emisi CO melawan Nisbah Setara

Berdasarkan Rajah 5, gaya lengkung yang merupakan saling kepada Rajah 4 dipamerkan oleh lengkung CO melawan nisbah setara. Pada nilai ϕ yang kurang dari 1, nilai kepekatan CO berkurangan dengan peningkatan nilai nisbah setara. Sementara bagi nilai ϕ yang besar dari 1, kepekatan CO mulai meningkat semula dengan peningkatan nilai nisbah setara. Ini menepati dengan teori yang menyatakan bahawa sebarang peningkatan pancaran NO akan mengurangkan pancaran CO [1].

Graf yang diplotkan juga menunjukkan perbandingan kepekatan emisi CO bagi pembakaran tanpa suntikan udara berperingkat dan pembakaran dengan udara berperingkat. Sama seperti yang berlaku pada emisi NO, pembakaran dengan udara berperingkat menunjukkan pengurangan emisi jika dibandingkan dengan pembakaran tanpa udara berperingkat. Pengurangan emisi sebanyak 29.5%, 45.3%, 54.4% dan 58.6% dialami dengan suntikan udara berperingkat berbanding dengan kajian pembakaran tanpa udara berperingkat untuk nisbah setara kurang dari 1.0. Begitu juga yang berlaku pada ϕ yang besar dari 1 dengan pengurangan sebanyak 53.3% dengan udara tambahan.



Rajah 5 Perbandingan Emisi CO melawan Nisbah Setara.

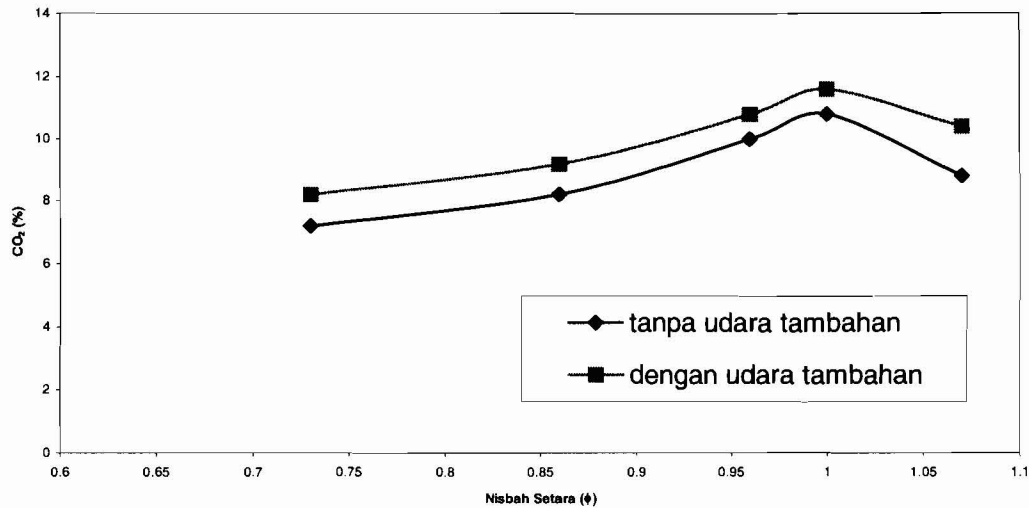
Diperhatikan pada ϕ yang lebih besar dari 1 berlakunya peningkatan pancaran CO. Ini adalah kerana pada nilai tersebut campuran bahanapi-udara adalah kaya bahan api, maka oleh sebab itu kuantiti CO yang banyak akan terpancar dari proses pembakaran akibat kekurangan oksigen yang mencukupi untuk melengkapkan tindakbalas dari CO ke CO₂.

5.3 CO₂ melawan Nisbah Setara

Terdapat perubahan yang tidak begitu ketara ke atas peratusan CO₂ yang terhasil dari proses pembakaran baik tanpa udara tambahan mahupun dengan udara tambahan. Jika dibandingkan dengan pembakaran tanpa udara berperingkat, didapati berlaku kenaikan peratusan CO₂ sebanyak 13.7%, 12.5%, 6.4%, 7.6% dan 12.8% bagi pembakaran dengan suntikan udara tambahan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6.

Ini berlaku kerana apabila udara tambahan dibekalkan, lebih banyak O₂ yang dibekalkan. Apabila suhu kebuk stabil dan mencapai suhu yang tinggi maka CO yang terbentuk akan bertindak balas dengan O₂ untuk menghasilkan CO₂. CO₂

merupakan gas yang stabil dan tidak bertoksid. Walau pun ia tidak merbahaya kepada hidupan, ia merupakan salah satu daripada komponen gas rumah hijau dan boleh mempengaruhi perubahan suhu muka bumi [6].



Rajah 6 Perbandingan CO₂ melawan Nisbah Setara.

6.0 KESIMPULAN

Secara keseluruhan, keberkesanan kaedah suntikan udara berperingkat bagi pengurangan emisi dengan cara 'post-flame reduction' dapat diperhatikan dan dikaji.

Kajian menunjukkan bahawa dengan suntikan udara berperingkat, nilai pancaran NO dan CO telah dapat dikurangkan dengan peratus pengurangan yang agak besar iaitu sebanyak 38.1%, 34.5%, 25.6% dan 27.5% bagi pancaran NO manakala bagi CO pula sebanyak 29.5%, 45.3%, 54.4% dan 58.6%, masing-masing dengan nisbah setara pada 0.73, 0.86, 0.92, 1.0 dan 1.07. Ini adalah bertepatan dengan teori bahawa penambahan udara berperingkat berperanan dalam mengurangkan pancaran emisi.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi terima kasih kepada Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar kerana memperuntukkan geran penyelidikan di bawah projek nombor 08-02-06-0030 EA 207 dan kepada Universiti Teknologi Malaysia kerana menyediakan ruang dan peralatan.

RUJUKAN

1. Lefebvre, A. H., 1997, *Pembakaran Turbin Gas*, Skudai. Penerbit UTM, ms 562-565.
2. Cengel, Y. A dan Boles, M. A., 2002, *Thermodynamics: An Engineering Approach (4th Edition)*, McGraw-Hill, ms 711-720.
3. Raymond, C dan Kagel, R, 1990, *Emission From Combustion Processes: Origin, Measurement, Control*, Lewis Publishers Inc.
4. Lister, D.H. dan Wedlock, M.I., 1978, *Measurement of Emissions Variability of a Large Aero-Engine*, ASME Paper No. 78-GT-75.
5. Ahmad Suhaimi Abd. Rahim, 1994, *Gaseous Fuel Gas Turbine For Low Emissions*, Department of Fuel and Energy, University of Leeds, Tesis PhD. ms 51-55.
6. Mohammad Nazri Mohd Jaafar, 1997, *Bilangan 3: Emissions from Gas Burner, Their Impact on the Environment and Abatement Techniques: A Review*, *Jurnal Mekanikal*, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, ms 50-70.